

РЕГРЕСІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВАРТІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕМЕНТІВ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 10-35 кВР. О. БУЙНИЙ<sup>1\*</sup>, В. О. ПЕРЕПЕЧЕНИЙ<sup>2</sup>, В. В. ЗОРІН<sup>3</sup><sup>1</sup> кафедра електричних систем і мереж, Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, УКРАЇНА<sup>2</sup> кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, УКРАЇНА<sup>3</sup> кафедра електропостачання, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА

\*email: buinyiroman@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Обґрунтування заходів зі зменшення технологічних витрат електричної енергії потребує достовірних вартісних показників. Автори дослідили зміну вартості кабельно-провідникової продукції від її перерізу, а також вартості трансформаторів від їх номінальної потужності та отримали відповідні регресійні залежності для напруг 10, 20 та 35 кВ. Дані залежності можуть бути використані для аналітичного розв'язку оптимізаційних задач.

**Ключові слова:** вартісні показники; трансформатори; проводи; кабелі; регресійні залежності; коефіцієнт детермінації; середньоквадратична похибка

REGRESSION RELATIONSHIPS FOR COSTS OF FACILITIES IN ELECTRICAL  
POWER NETWORKS 10-35 kVR. BUINYI<sup>1</sup>, V. PEREPECHENYI<sup>2</sup>, V. ZORIN<sup>3</sup><sup>1</sup> Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, UKRAINE<sup>2</sup> Department Systems of Power Supply and Electro-consumption of Cities, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, UKRAINE<sup>3</sup> Department of electricity, Institute for Energy Saving and Energy Management NTUU «I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Reliable cost estimates are necessary to justify the technological measures aimed at reducing power losses in electric power networks. It is of particular importance for the 10-35 kV networks in Ukraine and CIS countries. The authors analyzed large amounts of the relevant data and concluded that facilities costs are nearly linear functions of voltage class. The following cost dependencies are built and analyzed: cost of oil transformers vs rated apparent power, cables with XLPE insulation vs their cable cross sectional area and screen area, and ACSR conductors overhead lines vs cross sectional area. The corresponding regression lines for voltages of 10, 20 and 35 kV were also built and the quality of approximation is estimated with the coefficient of determination and mean-square error. More than 97% of variation in transformer costs is explained by their rated apparent power, more than 99% of variation in cable with XLPE insulation - by cross sectional area and screen area, and more than 99% of variation in the cost of ACSR conductors - by their cross sectional area. These results can be used to analytically solve the optimization problems and to justify the technological measures aimed at reducing power losses in medium voltage electric power networks.

**Keywords:** cost parameters; transformers; wires; cables; depending regression; coefficient of determination; the mean-square error

## Вступ

Останнім часом стає все важче робити техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) прийнятих рішень у електроенергетиці як на етапі проектування, так і на етапі виконання наукових досліджень. Це пояснюється практично повною відсутністю вартісних показників електрообладнання на офіційних сайтах заводів-виробників електротехнічної продукції. Причинами цього є, як правило, нестабільність національної валюти та так звана «корупційна» складова, яка може бути закладена «за бажанням» покупця електротехнічної продукції. Аналіз офіційних сайтів заводів-виробників електротехнічної продукції дозволив зробити висновок, що «закритість» вартісних

показників напряму пов'язана з номінальною напругою електричних мереж, для яких призначене електрообладнання. Причому зі збільшенням класу напруги «закритість» інформації збільшується, що пояснюється зменшенням конкуренції серед виробників обладнання.

В даний час нагальною проблемою в електричних мережах України та ближнього зарубіжжя, яку треба вирішувати першочергово, є зменшення втрат потужності та електричної енергії в електричних мережах до рівня, якого досягли провідні Європейські країни [1-3]. Найбільш гостро зазначена проблема стоїть в електричних мережах 0,38-35 кВ [4-5].

Для обґрунтування заходів зі зменшення втрат потужності та електричної енергії (наприклад, перехід

на більш високий клас напруги) необхідно знати вартісні показники обладнання, а для наукового обґрунтування – залежності вартостей від технічних параметрів (наприклад, перерізу проводу/кабелю, потужності трансформатора тощо). Деяка інформація щодо вартісних показників наведена у нормативному документі Міненерговугілля [6], проте для вирішення більшості задач з ТЕО її недостатньо.

### Мета роботи

Отримання регресійних залежностей вартостей кабельно-провідникової продукції від її перерізу та трансформаторів від їх потужності на напругах 10-35 кВ.

### Основні матеріали дослідження

Оскільки на етапі проектування та вирішення деяких наукових задач більшість вихідної інформації є заданою з невеликою точністю або взагалі в розмитому вигляді деяким діапазоном значень, то актуальним стає питання отримання залежності вартостей окремих елементів електричних мереж від їх параметрів, що дозволить розв'язувати оптимізаційні задачі направлені на підвищення ефективності їх роботи.

Аналіз великої кількості наявних вартісних показників, зокрема з джерел [7-8], дозволяє припустити, що залежність вартості обладнання є практично лінійною функцією від класу напруги. Для зменшення порядку величин подальші міркування були зроблені для вартостей з ПДВ у доларах США згідно рекомендацій [9] станом на 07.10.2016.

Графіки залежностей вартостей трансформаторів марки ТМ  $C_T$  від їх номінальної потужності  $S_{TH}$  для напруги 10/0,4, 20/0,4 та 35/0,4 кВ за даними прайс-листів заводів виробників зображені на рис.1.

З рис.1 видно, що залежності  $C_T = f(S_{TH})$  є майже лінійними функціями, тому для їх представлення у вигляді функціональної залежності можна скористатися загальним рівнянням лінійної регресії [10]:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n, \quad (1)$$

де  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, \dots, x_n$  – фактори, що впливають на величину вартості;  $n$  – кількість таких факторів.

Достовірність апроксимації можна оцінити за коефіцієнтом детермінації [10]:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}, \quad (2)$$

де  $SSR$ ,  $SST$  – сума квадратів регресії та повна сума квадратів відповідно.

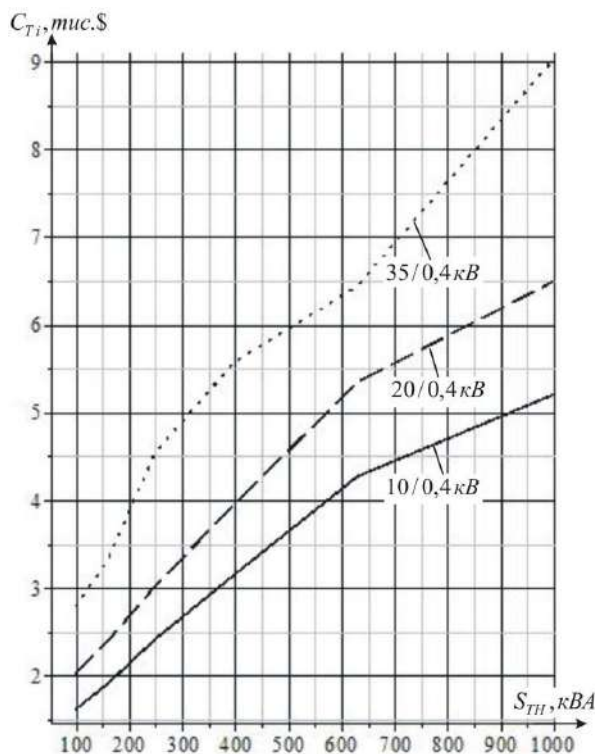


Рис. 1 – Залежності вартостей трансформаторів  $C_T$  від їх номінальної потужності  $S_{TH}$  на напругах 10/0,4 кВ, 20/0,4 кВ та 35/0,4 кВ

Величини  $SSR$  та  $SST$  розраховуються за формулами:

$$SSR = \sum_{i=1}^k (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2; \quad (3)$$

$$SST = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2; \quad (4)$$

де  $Y_i$ ,  $\hat{Y}_i$ ,  $\bar{Y}$  – фактичне, розраховане за регресійним рівнянням та середнє значення функції за заданих параметрів  $x_i$  відповідно;  $k$  – кількість заданих точок у вхідній вибірці з даними.

Для оцінки точності також використовують середньоквадратичну похибку:

$$S_{IX} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2}}. \quad (5)$$

Використовуючи формули (1)-(5) можна отримати регресійні залежності вартості

трансформаторів від його номінальної потужності (у кВА) для класів напруг 10/0,4, 20/0,4 та 35/0,4 кВ:

$$C_{T10} = 1,48 + 0,004 \cdot S_{TH}, \text{ тис. \$}; \quad (6)$$

$$C_{T20} = 1,85 + 0,005 \cdot S_{TH}, \text{ тис. \$}; \quad (7)$$

$$C_{T35} = 2,47 + 0,0066 \cdot S_{TH}, \text{ тис. \$}. \quad (8)$$

Результати оцінки точності отриманих регресійних залежностей по відношенню до відомих вартостей трансформаторів марки ТМ зведені у табл.1.

Таблиця 1 – Результати оцінки точності регресійних залежностей виду  $C_T = f(S_{TH})$  для напруг 10/0,4, 20/0,4 та 35/0,4 кВ

Параметр	Значення параметра для напруги, кВ		
	10/0,4	20/0,4	35/0,4
Коефіцієнт детермінації $R^2$	0,976	0,976	0,977
Середньоквадратична похибка $S_{yx}$ , тис. \$	±0,242	±0,302	±0,385

З табл.1 видно, що 97,6% варіації вартості трансформаторів на напрузі 10 та 20 кВ пояснюється саме їх номінальною потужністю, а 2,4% – іншими другорядними факторами. Дані результати свідчать про те, що отримані регресійні рівняння (6)-(8) є адекватними своїм вихідним даним та можуть бути використані для подальших ТЕО.

Аналогічно можна спробувати описати вартості проводів для повітряних ліній (ПЛ) та кабелів для кабельних ліній (КЛ) електропередавання.

Оскільки, останнім часом, в проектах перспективного розвитку міських електричних мереж застосовують кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену, то подальші міркування будуть стосуватися саме таких кабелів. Вартість 3-х фаз таких кабелів залежить не тільки від перерізу жили  $F$  та номінальної напруги, але і від перерізу екрану  $F_{екр}$ . Тому функція (1) набуде вигляду:

$$C_{КЛ} = f(F, F_{екр}) = a_0 + a_1 \cdot F + a_2 \cdot F_{екр}. \quad (9)$$

Залежності погонних вартостей 3-х фаз кабелю на напругу 10, 20 та 35 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену марки АПвЭгаПу, побудовані за даними прайс-листів заводів виробників кабельної продукції, від перерізу жили  $F$  для різних перерізів екранів  $F_{екр}$  зображені на рис. 2.

Отримані регресійні залежності погонної вартості 3-х фаз кабелів для класів напруг 10, 20 та 35 кВ мають вид:

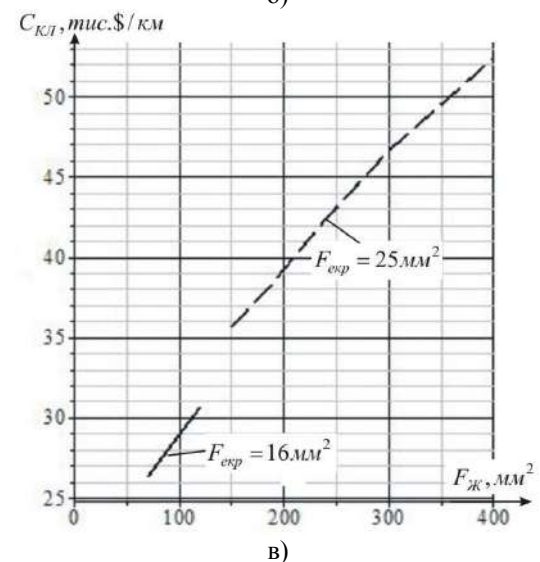
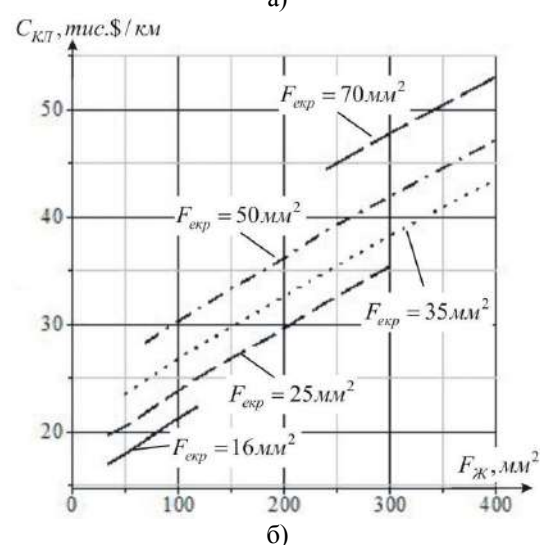
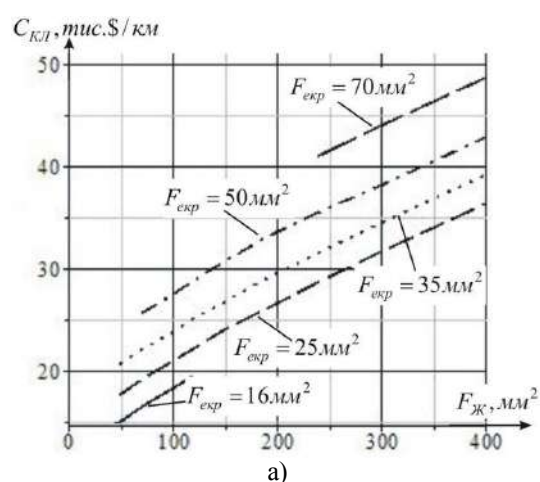


Рис. 2 – Залежності погонної вартості 3-х фаз кабелю марки АПвЭгаПу від його перерізу  $F$  за перерізу екрану  $F_{екр} = 16, 25, 35, 50$  та  $70 \text{ мм}^2$  на напругу: а) 10 кВ; б) 20 кВ; в) 35 кВ

$$C_{КЛ10} = 7,344 + 0,053 \cdot F + 0,317 \cdot F_{\text{екр}}, \text{ тис. \$/км}; \quad (10)$$

$$C_{КЛ20} = 9,68 + 0,058 \cdot F + 0,31 \cdot F_{\text{екр}}, \text{ тис. \$/км}. \quad (11)$$

$$C_{КЛ35} = 15,266 + 0,068 \cdot F + 0,414 \cdot F_{\text{екр}}, \text{ тис. \$/км}. \quad (12)$$

Результати оцінки точності отриманих регресійних залежностей по відношенню до відомих вартостей кабелів зведені у табл.2.

Таблиця 2 – Результати оцінки точності регресійних залежностей виду  $C_{КЛ} = f(F, F_{\text{екр}})$  для напруги 10, 20 та 35 кВ

Параметр	Значення параметра для напруги, кВ		
	10	20	35
Коефіцієнт детермінації $R^2$	0,999	0,999	0,998
Середньоквадратична похибка $S_{\text{yx}}$ , тис.\$	±0,415	±0,321	±0,49

З табл. 2 видно, що 99,9% (99,8%) варіації погонної вартості 3-х фаз кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напрузі 10 та 20 кВ (35 кВ) пояснюється саме його перерізами жили  $F$  та екрану  $F_{\text{екр}}$ , а 0,1% (0,2%) – іншими другорядними факторами. Дані результати свідчать про те, що отримані регресійні рівняння (10)-(12) є адекватними своїм вихідним даним та можуть бути використані для подальших ТЕО.

Використовуючи отримані залежності виду  $C_{КЛ} = f(F, F_{\text{екр}})$  можна отримати вартість 3-х фаз КЛ відповідного класу напруги за будь-якого перерізу жили  $F$  та перерізу екрану  $F_{\text{екр}}$ . Дані залежності є справедливими для кабелів на напруги 10, 20 та 35 кВ, які є складовими електричних мереж категорій А та В у відповідності до ІЕС 60183 та ІЕС 60502-2 [11-12].

У електричних мережах з малою щільністю навантаження в основному використовуються неізолювані проводи марки АС. Тому для таких мереж необхідно отримати регресійні рівняння погонної вартості 3-х фаз проводу від його перерізу  $F$ .

Залежності погонних вартостей проводу марки АС від його перерізу  $F$  (для 3-х фаз ПЛ) зображені на рис.3 (за даними прайс-листів заводів виробників кабельно-провідникової продукції).

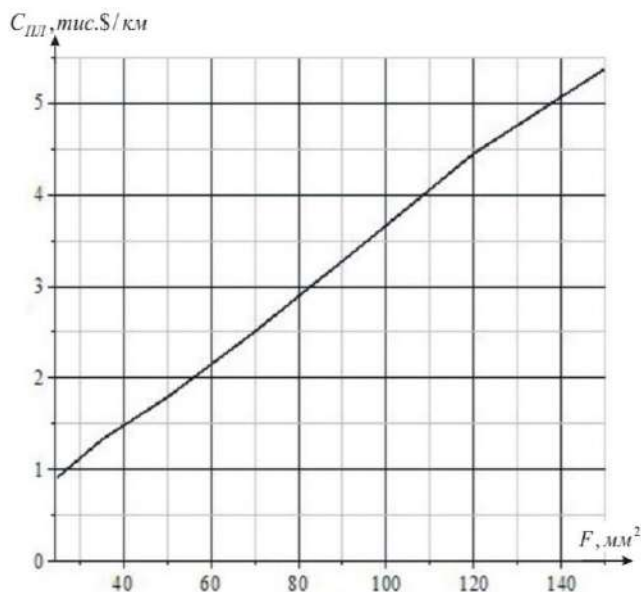


Рис. 3 – Залежності погонної вартості проводів у 3-х фазах ПЛ від їх перерізу  $F$

З рис. 3 видно, що залежність виду  $C_{\text{ПЛ}} = f(F)$  також можна представити у вигляді рівняння (1):

$$C_{\text{ПЛ}} = f(F) = a_0 + a_1 \cdot F. \quad (13)$$

Отримане рівняння регресії погонної вартості 3-х фаз проводу марки АС від перерізу  $F$  має вид:

$$C_{\text{ПЛ}} = 0,006 + 0,0358 \cdot F, \text{ тис. \$/км}. \quad (14)$$

Результати оцінки точності рівняння регресії по відношенню до вартісних показників заводів-виробників провідникової продукції зведено у табл.3.

Таблиця 3 – Результати оцінки точності регресійних залежностей виду  $C_{\text{ПЛ}} = f(F)$

Параметр	Значення параметра
Коефіцієнт детермінації $R^2$	0,999
Середньоквадратична похибка $S_{\text{yx}}$ , тис.\$	±0,062

З табл.3 видно, що 99,9% варіації погонної вартості 3-х фаз проводу пояснюється саме його перерізом  $F$ , а 0,1% – іншими другорядними факторами. Дані результати свідчать про те, що отримане регресійне рівняння (14) є адекватними своїм вихідним даним та може бути використане для подальших ТЕО.

Використовуючи отриману залежність виду  $C_{\text{ПЛ}} = f(F)$  можна отримати орієнтовну вартість проводу у трифазній ПЛ за будь-якого перерізу  $F$ .

**Висновки**

Отримано регресійні залежності вартостей на напругах 10, 20 та 35кВ:

- кабельно-провідникової продукції від перерізу жил (та екранів);
- трансформаторів від їх номінальної потужності.

Зазначені залежності можуть бути використані для техніко-економічного обґрунтування заходів зі зменшення втрат потужності та електричної енергії у розподільних електричних мережах України та під час наукових досліджень.

Отримані залежності дозволяють шукати розв'язок оптимізаційної задачі аналітично.

**Список літератури**

- 1 EURELECTRIC. Electricity for Europe. – Режим доступу: <http://www.eurelectric.org/powerdistributionineurope/>
- 2 **Anjan, K. D.** Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications – CRC Press, 2000. – 258p.
- 3 **Turan, G.** Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. – 2nd Edition. – CRC Press, 2009. – 728p.
- 4 **Зорин, В. В.** Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38кВ / **В. В. Зорин, Р. А. Буйный, В. А. Перепеченый** // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2015. – №5(136). – С.19-27.
- 5 **Гомельський, Д. К.** Кластеризація структур розподільних електричних мереж напругою 10 кВ / **Д. К. Гомельський, Р. О. Буйний, А. О. Квицинський** // *Енергетика та електрифікація*. – 2014. – №4. – С.34-37.
- 6 СОУ-Н МЕВ 45.2-37471933-44. Укрупнені показники вартості будівництва підстанцій напругою від 6 кВ до 150 кВ та ліній електропередавання напругою від 0,38 кВ до 150 кВ. Норми – К.: Міненерговугілля України, 2015. – 40с.
- 7 Сайт комісії «ТОВ «АЕС-8». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://atrans.in.ua/transformatoryi-tm-106-04-novyie/c1> - 07.10.2016.
- 8 Сайт ПАТ «Завод «Южкابل». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.yuzhcable.com.ua/>. – 07.10.2016.
- 9 ГКД 340.000.002. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі – К.: Міненерго України, 1997. – 53с.
- 10 **Patrick, K. W.** A Practical Introduction to Econometric Methods: Classical and Modern / **K. W. Patrick, S. T. Sonja**. – Barbados: University of the West Indies Press, 2002. – 322p.
- 11 IEC 60183:2015. Guidance for the selection of high-voltage A.C. cable systems.

- 12 IEC 60502-2:2014. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV).

**Bibliography (transliterated)**

- 1 EURELECTRIC. Electricity for Europe. – Access mode: <http://www.eurelectric.org/powerdistributionineurope/>
- 2 **Anjan, K. D.** Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications, CRC Press, 2000, 258p.
- 3 **Turan, G.** Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. 2nd Edition, CRC Press, 2009, 728p.
- 4 **Zorin, V. V., Buynyi, R. A., Perepechenyi, V. A.** Modeli i metodyi rascheta i otsenki poter moschnosti i elektricheskoy energii v raspredelitelnykh setyakh 0,38kV [Models and methods for calculating and estimating power losses and electrical energy in distribution networks 0.38 kV]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit* [Energy saving. Power engineering. Energy audit], 2015, №5(136), 19-27.
- 5 **Homelskyi, D. K., Buynyi, R. O., Kvytsynskyi, A. O.** Klasteryzatsiya struktur rozpodil'nykh elektrychnykh merezh napruhouy 10 kV [Clustering structures distributive networks with voltage 10 kV]. *Enerhetyka ta elektrifikatsiya* [Energy and Electrification], 2014, №4, 34-37.
- 6 СОУ-Н МЕВ 45.2-37471933-44. Ukrupneni pokaznyky vartosti budivnytstva pidstantsiy napruhouy vid 6 kV do 150 kV ta liniy elektroperedavannya napruhouy vid 0,38 kV do 150 kV. Normy [Consolidated figures the cost of construction of substations 6 kV to 150 kV power transmission lines and voltage from 0.38 kV to 150 kV. Norms], Kyiv: Minenerhovuhillya Ukrayiny, 2015, 40p.
- 7 Sayt komisiyi «TOV «AES-8». – Access mode: <http://atrans.in.ua/transformatoryi-tm-106-04-novyie/c1> - 07.10.2016.
- 8 Sayt PAT «Zavod «Yuzhkabel». – Access mode: <http://www.yuzhcable.com.ua/>. – 07.10.2016.
- 9 ГКД 340.000.002. Vyznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti kapital'nykh vkladenn' v enerhetyku. Metodyka. Enerhosystemy i elektrychni merezhi [Determining the cost-effectiveness of investments in the energy sector. Method. Grid and electric networks], Kyiv: Minenerho Ukrayiny, 1997, 53p.
- 10 **Patrick, K. W., Sonja, S. T.** A Practical Introduction to Econometric Methods: Classical and Modern, Barbados: University of the West Indies Press, 2002, 322p.
- 11 IEC 60183:2015. Guidance for the selection of high-voltage A.C. cable systems.
- 12 IEC 60502-2:2014. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV).

**Відомості про авторів (About authors)**

**Буйний Роман Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри електричних систем і мереж; м. Чернігів, Україна; e-mail: buinyiroman@gmail.com.

**Roman Buynyi** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor, Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine; e-mail: buinyiroman@gmail.com.



**Перепечений Віталій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, доцент кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст; м. Харків, Україна; e-mail: jahoma@i.ua.

**Vitaliy Perepechenyi** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor, Department Systems of Power Supply and Electro-consumption of Cities, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; e-mail: jahoma@i.ua.

**Зорін Владлен Володимирович** – доктор технічних наук, професор, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», професор кафедри електропостачання, м. Київ, Україна; e-mail: vladlenvlzorin@mail.ru.

**Vladlen Zorin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Electricity, Institute for Energy Saving and Energy Management NTUU «I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: vladlenvlzorin@mail.ru.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Буйний, Р. О.** Регресійні залежності вартісних показників елементів електричних мереж напругою 10-35 кВ / **Р. О. Буйний, В. О. Перепечений, В. В. Зорін** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 18-23. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03.

*Please cite this article as:*

**Buinyi, R., Perepechenyi, V., Zorin, V.** Regression relationships for costs of facilities in electrical power networks 10-35 kV. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 18–23, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Буйный, Р. А.** Регрессионные зависимости стоимостных показателей элементов электрических сетей напряжением 10-35 кВ / **Р. А. Буйный, В. А. Перепечений, В. В. Зорин** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 18-23. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03.

**АННОТАЦИЯ** Обоснование мероприятий по снижению технологического расхода электроэнергии требует достоверных стоимостных показателей. Авторы исследовали изменение стоимости кабельно-проводниковой продукции от ее сечения, а также стоимости трансформаторов от их номинальной мощности и получили соответствующие регрессионные зависимости для напряжений 10, 20 и 35 кВ. Данные зависимости могут быть использованы для аналитического решения оптимизационных задач.

**Ключевые слова:** стоимостные показатели; трансформаторы; провода; кабели; регрессионные зависимости; коэффициент детерминации; среднеквадратичная погрешность

*Надійшла (received) 10.03.2017*